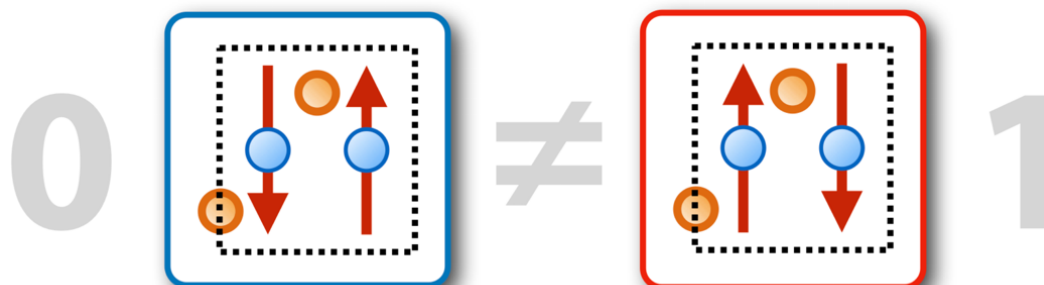


東京大学
理化学研究所
J-PARC センター
高エネルギー加速器研究機構
科学技術振興機構 (JST)

室温で情報の読み書きが可能な 交代磁性体（「第三の磁性体」）を発見 ——超高密度・超高速な次世代の情報媒体に——

発表のポイント

- ◆ 交代磁性体と呼ばれる新しいカテゴリの磁性体の物質探索を行い、室温で情報の読み書きが可能な物質を世界で初めて発見しました。
- ◆ 既存の磁気記憶素子では強磁性体における↑（上向き）と↓（下向き）のスピンの状態を利用して情報を記憶していますが、交代磁性体では↑↓と↓↑のスピンの状態で情報を記憶し、かつ強磁性体と同等の手法で情報の読み書きを行うことが可能です。
- ◆ 交代磁性体は、従来利用されてきた強磁性体と異なり、①ビット間干渉の原因となる漏れ磁場が存在しないため素子の集積化に有利、②応答速度が 100 倍以上高速、③磁気的な外乱に対する耐性が高い、といった特徴を持ち、次世代の超高密度・超高速な情報媒体としての活用が期待されます。



交代磁性体の概念図

概要

東京大学大学院工学系研究科の関 真一郎教授、高木 里奈助教（現：同大学物性研究所准教授）、同大学工学部の開田 亮佑学部生（現：同大学大学院理学系研究科大学院生）、同大学先端科学技術研究センターの有田 亮太郎教授（現：同大学大学院理学系研究科教授、理化学研究所チームリーダー）、野本 拓也講師（現：東京都立大学准教授）らによる研究グループは、交代磁性体（「第三の磁性体」）と呼ばれる新しいカテゴリの磁性体の物質探索を行い、室温で情報の読み書きが可能な世界初の物質の発見に成功しました。

現在利用されている磁気記憶素子では、強磁性体における↑と↓のスピンの状態（注 1）を利用して、情報の記憶が行われています。一方で 2020 年代に入り、↑↓と↓↑のスピンの状態で情報を記憶し、かつ強磁性体と同等の手法で情報の読み書きが可能な、「交代磁性体」の概念が理論的に提案され、注目を集めています（図 1）。本研究では、磁性半導体である FeS（硫化鉄）が室温で動作可能な交代磁性体であることを実験的に明らかにするとともに、外場（電場、磁

場など) のない状態で情報が不揮発に保持されること、さらに↑↓と↓↑のスピンの電氣的な読み出しが可能であることを実証しました。

交代磁性体は、従来利用されてきた強磁性体と異なり、①ビット間干渉の原因となる漏れ磁場(注2)が存在しないため素子の集積化に有利、②応答速度が100倍以上高速、③磁氣的な外乱に対する耐性が高い、といった、応用上有利な特徴を持ちます。今回の室温で情報の読み書きが可能な交代磁性体の発見は、その超高密度・超高速な次世代の情報媒体としての活用につながることを期待されます。

本研究成果は、2024年12月13日(英国時間)に英国科学誌「Nature Materials」のオンライン版に掲載されました。

	強磁性体 (紀元前～)	反強磁性体 (1930年代～)	交代磁性体 (2020年代～)
0			
1			
状態の区別	区別できる	区別できない	区別できる

図1: 交代磁性体の概念図

これまでに知られていた2つの代表的な磁性体(強磁性体・反強磁性体)と、交代磁性体を比較したもの。赤い矢印はスピンの向きを表している。一般的な反強磁性体の場合、↑↓と↓↑のスピンの状態が平行移動によって一致してしまうため、2つの状態を区別することができない。交代磁性体は、反平行なスピン配列と、特殊な対称性の原子配列を併せ持っており、↑↓と↓↑の2つのスピン状態が区別可能となっている。

発表内容

磁性体は、現在の情報社会のあらゆる場面で利用されており、磁気情報の効率的な保持・制御のための新手法の開拓が大きな課題となっています。例えば、私たちの日常でよく目にする磁石の中では、N極の方向に電子のスピンの向きを揃えて平行に整列した状態が実現しています。このような物質は強磁性体と呼ばれ、現在の磁気記憶素子(MRAM・ハードディスクなど)では、強磁性体における↑と↓のスピンの状態が情報の記録に利用されています(図1)。強磁性体は、磁化(磁性体中のスピンの平均値に相当・注3)に起因したさまざまな応答を示す事が知られており、この性質を使って情報の読み書きを行うことが可能です。一方、もう1つの代表的な磁性体として、スピンの向きが反平行に整列した反強磁性体が知られています。しかし、反強磁性体における↑↓と↓↑のスピンの状態は、通常は平行移動によって完全に一致してしまうため、区別して読み出すことが困難で、情報の保持には不向きであると考えられてきました。

しかし最近、反平行なスピン配列と、特殊な対称性の原子配列を併せ持つ、「交代磁性体(Altermagnet)」と呼ばれる新しいカテゴリの磁性体が理論的に提案され、第三の磁性体として大きな注目を集めています(図1)。交代磁性体では、特殊な原子配列のおかげで、↑↓と↓↑

のスピンの状態が平行移動しても一致しないため、両者を区別して読み出すことが可能です。また、このような状況においては、 $\uparrow\downarrow$ と $\downarrow\uparrow$ のスピンの状態の下で運動する電子が、量子力学的な機構を通じてそれぞれ逆符号の大きな仮想磁場（注 4）を感じるということがわかっており、磁化がゼロであるにも関わらず、強磁性体と同等の手法による情報の読み書きができることが予測されています（図 2）。例えば、強磁性体では電流に直交した方向に起電力が生じる「ホール効果」（注 5）と呼ばれる現象が、磁化に比例して生じることが知られています。一方、交代磁性体の場合には、 $\uparrow\downarrow$ と $\downarrow\uparrow$ の2つのスピンの状態が、仮想磁場を介して逆符号のホール効果を生じることが予想されており、この現象を使って2つの状態を電氣的に区別して読み出すことができると期待されます。

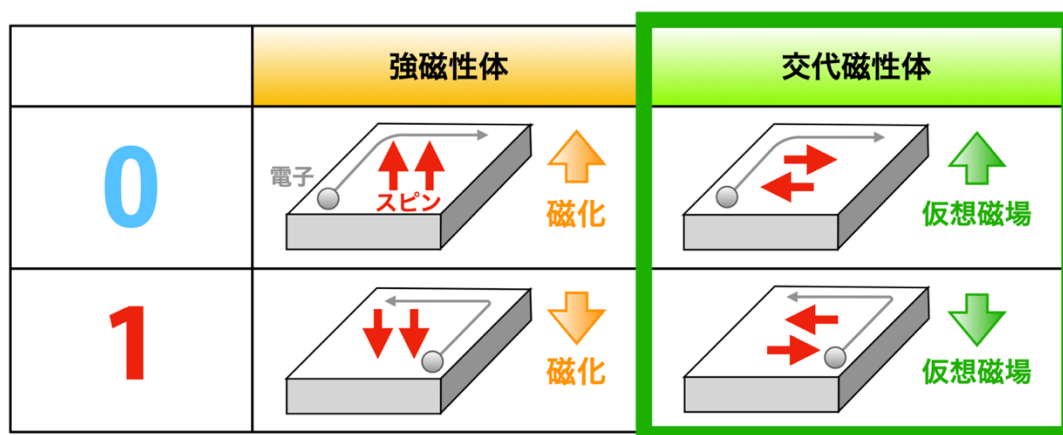


図 2：強磁性体と交代磁性体におけるホール効果

強磁性体では、磁化に比例したホール効果が生じることが知られており、この現象を利用して \uparrow と \downarrow のスピンの状態を区別して読み出すことができる。磁化がゼロの反強磁性体では、こうしたホール効果は通常生じない。一方、交代磁性体の場合、 $\uparrow\downarrow$ と $\downarrow\uparrow$ のスピンの状態が、量子力学的な機構を通じて逆符号の仮想磁場を誘起することで、磁化がゼロでもホール効果が生じる。この現象を利用して2つの状態を電氣的に区別して読み出すことが可能である。

本研究では、こうした概念を実現する新物質を探索することで、室温で情報の読み書きが可能な世界初の交代磁性体を発見することに成功しました。具体的には、磁性半導体である FeS が、室温で動作可能な交代磁性体であることを X 線・中性子回折実験により突き止め、外場のない状態で情報が不揮発に保持されることを明らかにしました。さらに、ホール効果の測定を通じて、 $\uparrow\downarrow$ と $\downarrow\uparrow$ の2つのスピンの状態を電氣的に区別して読み出すことに成功しました（図 3）。第一原理計算による詳細な解析を行うことで、前述の理論による予測通り、観測されたホール効果が反平行スピン配列によって誘起される仮想磁場に起因していることを明らかにしました。

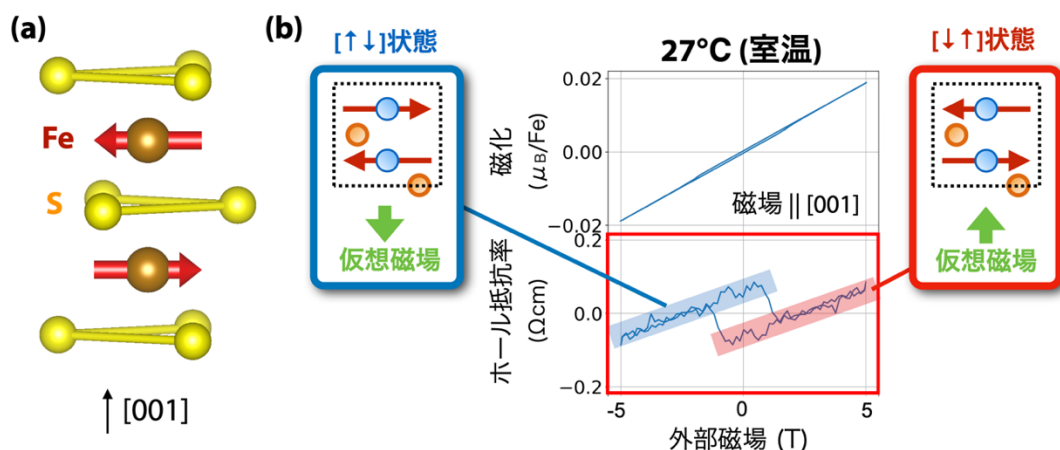


図 3：室温で情報の読み書きが可能な交代磁性体 FeS

(a) FeS におけるスピン配列と原子配列。(b) 室温における磁化とホール抵抗率の外部磁場依存性。ホール抵抗率にはヒステリシス（注 6）を伴う大きな信号が観測されており、反平行スピン配列が誘起する仮想磁場がその起源となっている。外部磁場の符号によって $\uparrow\downarrow$ と $\downarrow\uparrow$ のスピン状態を不揮発に切り替えることができ、ホール効果によって 2 つの状態を電気的に読み出すことが可能である。

交代磁性体は、従来利用されてきた強磁性体と異なり、①ビット間干渉の原因となる漏れ磁場が存在しないため素子の集積化に有利、②応答速度が 100 倍以上高速、③磁気的な外乱に対する耐性が高い、といった、応用上有利な特徴を持ちます。FeS は磁気秩序温度（スピンが整列する温度）が 300°C 程度と非常に高く、今回の室温で情報の読み書きが可能な交代磁性体の発見は、その超高密度・超高速な次世代の情報媒体としての活用につながることを期待されます。

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院工学系研究科

附属総合研究機構

高木 里奈 研究当時：助教

研究当時：東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 助教

科学技術振興機構 さきがけ研究者

現：東京大学物性研究所 准教授

北折 暁 助教

兼：東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 助教

科学技術振興機構 さきがけ研究者

関 真一郎 研究当時：准教授

研究当時：科学技術振興機構 さきがけ研究者

現：東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授

物理工学専攻

摂待 裕生 研究当時：修士課程

高木 寛貴 研究当時：修士課程

山内 健聖 修士課程

井上 裕貴 修士課程

工学部物理工学科

開田 亮佑 研究当時：学部生

現：東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程

物性研究所

附属物質設計評価施設

山浦 淳一 准教授

浜根 大輔 技術専門職員

附属中性子科学研究施設

Seno Aji 研究当時：特別研究員

現：インドネシア大学物理学科 講師・研究員

齋藤 開 助教

中島 多朗 准教授

先端科学技術研究センター

野本 拓也 研究当時：講師

研究当時：科学技術振興機構 さきがけ研究者

現：東京都立大学大学院理学研究科物理学専攻 准教授

有田 亮太郎 研究当時：教授

現：東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授

兼：理化学研究所創発物性科学研究センター計算物質科学研究チーム チームリーダー

理化学研究所 創発物性科学研究センター 計算物質科学研究チーム

大岩 陸人 基礎科学特別研究員

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

伊藤 晋一 教授

論文情報

雑誌名：Nature Materials

題名：Spontaneous Hall effect induced by collinear antiferromagnetic order at room temperature

著者名：R. Takagi*, R. Hirakida, Y. Settai, R. Oiwa, H. Takagi, A. Kitaori, K. Yamauchi, H. Inoue, J. Yamaura, D. Nishio-Hamane, S. Itoh, S. Aji, H. Saito, T. Nakajima, T. Nomoto, R. Arita, S. Seki*

DOI：10.1038/s41563-024-02058-w

URL：<https://www.nature.com/articles/s41563-024-02058-w>

研究助成

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST の「未踏探索空間における革新的物質の開発」研究領域（No. JPMJCR2304）、同戦略的創造研究推進事業さきがけの「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」研究領域（No. JPMJPR18L5、JPMJPR20L7）、「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」研究領域（No. JPMJPR20B4）および「物質探索空間の拡大による未来材料の創製」研究領域（No. JPMJPR23Q3）、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業基盤研究 S（No. 21H04990、22H04965）、同基盤研究 A（No. 18H03685、20H00349、21H04437）、同基盤研究 B（No. 24K00579）、同挑戦的研究（萌芽）（No. 20K21067、21K18595）、同若手研究（No. 21K13876、23K13069）、同新学術領域研究（研究領域提案型）（No. 19H05825、24H02235）、旭硝子財団、村田学術振興財団、東京大学克研究奨励賞、UTEC-UTokyo FSI Research Grant Program の助成を受けて行われました。中性子散乱実験は J-PARC 物質・生命科学実験施設の BL12HRC（課題番号：2023S01）と JRR-3 の利用研究課題（23520）として行われました。

用語解説

（注 1）スピン

エレクトロニクスの主役である電子は、電荷とスピンの 2 つの自由度を持つ粒子であることが知られています。このうち、スピンの自由度は、電子の自転が生み出す角運動量に由来しています。スピンは原子サイズの棒磁石のような性質を持っており、磁性体の中ではこのスピンの一定の規則に従って整列した状態が実現しています。

（注 2）漏れ磁場

強磁性体における磁化は、物質の外部に磁力線（漏れ磁場）を生じることが知られています。強磁性体のビット素子の体積を小さくして高密度に詰め込むと、漏れ磁場のせいでビット間の干渉が生じて磁気情報の安定した保持が難しくなることが知られており、この点が磁気情報の高密度化に向けた大きな阻害要因になっていました。磁化を持たない交代磁性体は、原理的に漏れ磁場を生じないため、こうした問題を回避して素子のさらなる集積化・高密度化を実現できる可能性が期待されます。

（注 3）磁化

スピンは「磁気モーメント」と呼ばれるベクトル量によって特徴付けられ、単位体積あたりの磁気モーメントは「磁化」と呼ばれます。これは磁性体内部におけるスピンの平均値に相当します。

（注 4）仮想磁場

特殊なスピン配列の下で電子が運動する際に、電子を感じる仮想的な磁場のこと。量子力学的な効果に起因しており、現実の磁場をかけていないにも関わらず、あたかも磁場が存在しているかのように電子が振る舞うことから、このような名称で呼ばれています。

（注 5）ホール効果

電子の進行方向が何らかの理由によって曲がる現象のこと。通常、電子は電場に対して真っ直ぐに運動しますが、磁場や磁化が存在する環境下では、電場と直交した方向に電子を動かそうとする力が生じ、これがホール効果の起源となることが知られています。交代磁性体の場合に

は、外部磁場や磁化がゼロの状況であっても、物質内部の仮想磁場を通じてホール効果が生じるという特徴があります。

(注6) ヒステリシス

系の状態が、過去に加えられた外場に依存して変化する現象のこと。外場を正→ゼロと変化させた場合と、負→ゼロと変化させた場合で、実現する状態が異なっていれば、2つの状態を0/1のビット情報とみなすことで、不揮発に情報を保持・書き換えできていることになります。

問合せ先

(研究内容については発表者にお問合せください)

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻

教授 関 真一郎 (せき しんいちろう)

Tel : 03-5841-7696 E-mail : seki@ap.t.u-tokyo.ac.jp

東京大学物性研究所

准教授 高木 里奈 (たかぎ りな)

Tel : 04-7136-3245 E-mail : rina.takagi@issp.u-tokyo.ac.jp

〈報道に関すること〉

東京大学大学院工学系研究科 広報室

Tel : 03-5841-0235 E-mail : kouhou@pr.t.u-tokyo.ac.jp

理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 050-3495-0247 E-mail : ex-press@ml.riken.jp

J-PARC センター 広報セクション

Tel : 029-287-9600 E-mail : pr-section@ml.j-parc.jp

高エネルギー加速器研究機構 広報室

Tel : 029-879-6047 E-mail : press@kek.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho@jst.go.jp

〈JST 事業に関すること〉

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔 (あんどう ゆうすけ)

Tel : 03-3512-3531 E-mail : crest@jst.go.jp